

БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

**Пространственно-временная модель урбоэкосистем
как сопряженных активных сред**А. Э. Сидорова^{1,a}, Ю. В. Мухартова^{2,b}

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
1 кафедра биофизики; 2 кафедра математики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^a sky314bone@mail.ru, ^b muhartova@yandex.ru*

Статья поступила 26.04.2013, подписана в печать 22.05.2013.

В настоящей работе рассмотрена пространственно-временная модель урбоэкосистем как сопряженных активных сред. Данный подход основан на представлении урбоэкосистем как самоорганизующихся систем, направлен на выявление пороговых значений управляющих параметров и представляется перспективным при оценке системной устойчивости к внутренним и внешним флуктуациям.

Ключевые слова: самоорганизация, иерархия активных сред, автоволны, урбоэкосистемы.
УДК: 573.01. PACS: 02.30.Jr.

Введение

В настоящее время урбоэкосистемы (УЭС) — один из наиболее активно эволюционирующих элементов экосферы — характеризуются значительной фрагментированностью антропогенных воздействий и биоценозов, размытостью системных границ, подавляющим количеством необратимых системных процессов, несоответствием характерных времен и масштабов эволюции природной и антропогенной подсистем. Представление УЭС в качестве взаимодействующих природно-антропогенных подсистем состоит в рассмотрении общих закономерностей экологически опасных перекрестных антропогенных воздействий, генерируемых территориально связанными промышленными и жилыми объектами, а также буферной емкости природных подсистем, составляющих общие урбобиоценозы. Теоретической базой представляемого системного анализа является анализ устойчивости УЭС, который строится на основе синергетических представлений об автоволновой самоорганизации в распределенных активных средах [1].

Система, в которой происходят процессы самоорганизации, с необходимостью функционирует в колебательном режиме. В пространстве это режим волновой, а в активной среде, где самой системой поддерживается устойчивость — автоволновой. Необходимой предпосылкой возникновения эффекта самоорганизации в границах природно-антропогенных экосистем, является синергетическое соответствие биотических и абиотических факторов масштабам антропогенного воздействия. В УЭС как неравновесных системах при одном и том же наборе начальных условий и локальных неоднородностей (вне критических условий функционирования) за счет многоплановой и постоянно усложняющейся сети прямых и обратных связей увеличивается взаимовлияние элементов подсистем и возрастает множество возможных траекторий развития.

Среда с распределенным ресурсом энергии и сцепленной сетью обратных связей континуумом нелиней-

ных трансформаторов энергии формирует диссипативную автоволновую структуру с новыми выделенными степенями свободы на макроскопическом уровне [1]. Линейным системам присущ принцип суперпозиции, а нелинейным — неаддитивность, формируемая высокой интенсивностью эндогенных процессов или петлями отрицательных и положительных обратных связей. Поэтому в нелинейных открытых неравновесных системах малые флуктуации способны развиваться в «гигантские», образуя диссипативные структуры. В результате нелинейности и неаддитивности системных процессов в УЭС наибольшее количество прямых и обратных связей приходится на долю природной подсистемы как более стабильной структуры, положительные обратные связи, в основном, наблюдаются на подсистемном уровне, а отрицательные — между подсистемами, что лимитирует структурно-функциональные возможности системы в целом [2, 3]. Нелинейным взаимодействиям в открытых системах, к которым относятся УЭС, свойственны дальнедействующие корреляции, амплитуды которых растут по мере приближения к точке бифуркации и тем самым переводят систему через этап статистической независимости к когерентной согласованности элементов. Этот процесс связан с зависимостью управляющих (критических) параметров экосистемы от структуры и свойств подсистем и наоборот. Чем сложнее структура экосистемы (иерархии и сети прямых и обратных связей), тем сложнее функциональные взаимодействия и тем большему количеству перемежающихся стационарных устойчивых и неустойчивых состояний одновременно может быть подвержена система (мультистабильность).

Устойчивость в значительной степени фрагментированных городских биоценозов связана с синергизмом воздействий на экосистему различных факторов — площади биоценозов, их количественного и качественного состава, климатических условий, антропогенных факторов, численности и плотности населения и др., что ограничивает буферную емкость природной подсистемы УЭС. В большинстве случаев характерные для

УЭС антропогенные факторы связаны с формированием техногенных полей, охватывающих практически всю верхнюю часть литосферы (в границах экосистемы) и оказывающих совокупное неаддитивное воздействие на формирование структуры и функций экосистемы.

В общем случае УЭС можно отнести к реакционно-диффузионно-автокаталитическим системам. Термодинамическая неравновесность, нелинейность, бифуркационное развитие — синергетическая база самоорганизации УЭС в моделях активных сред [4]. Распределенный ресурс системы утилизируется взаимосвязанными нелинейными локальными трансформаторами: для физико-химической системы — это распространяющаяся в пространстве фаза процесса. Локальные трансформаторы энергии и вещества ее не переносят, а высвобождают и преобразуют сопряженно с автокаталитическим преобразованием вещества при наличии «возмущения» в соседних ячейках или при получении управляющего сигнала через обратную положительную или отрицательную связь.

УЭС как иерархические сопряженные активные среды обладают следующими свойствами:

1) наличием распределенного ресурса (энергия, вещество, информация) и источников воздействия, модулирующих системные процессы. Вследствие существования рефрактерных зон исключены явления интерференции. Возможно наличие различных динамических режимов (регулярных автоколебательных и автоволновых) и нерегулярных — хаотических;

2) УЭС — нелинейные динамические макроструктуры, образующие иерархические системы из сопряженных природных и антропогенных подсистем. Для упрощения трехмерная иерархическая структура рассматривается как двумерная. Динамика УЭС определяется взаимодействиями прямых и обратных связей взаимодействующих подсистем;

3) управляющими параметрами являются природные и антропогенные факторы (возбудимые элементы), формирующие длину и форму автоволн;

4) скорости природных процессов много меньше скоростей антропогенных процессов, Поэтому принимаем в качестве активатора общесистемных процессов — антропогенные процессы, а ингибитора — природные;

5) УЭС обладают свойством самоорганизации, проявляющимся в образовании автоволновых диссипативных структур, формирующих выделенные степени свободы. В подобных средах происходит уменьшение исходного числа степеней свободы, эффективно описывающих систему. Выделенные степени свободы определяют типы симметрии образующихся структур и тенденции их эволюции;

6) для УЭС как неоднородных активных сред возможно возникновение подпороговых взаимодействий соседних элементов.

Рассмотренные свойства позволяют качественно оценить пороговые и подпороговые условия распространения автоволнового процесса в зависимости от значения коэффициентов диффузии активатора и ингибитора (качественный переход в режимах происходит уже при близких по значению соотношениях коэффициентов диффузии), расположения возбудимых, слабо-

возбудимых и невозбудимых зон, наличия латентных источников автоволн и от других факторов.

1. Пространственно-временная модель урбозкосистем как сопряженных активных сред

На базе уравнения Фитц-Хью-Нагумо [5] авторами предложена система уравнений

$$\begin{cases} \varepsilon^2 \left(\frac{\partial u}{\partial t} - D_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) = -u(u - \alpha)(u - 1) - uv, \\ \frac{\partial v}{\partial t} - D_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -\gamma v + \beta u, \end{cases} \quad (1)$$

где u — функция интенсивности активатора (антропогенных процессов); v — функция интенсивности ингибитора (природных процессов). Предложенное авторами произведение uv расширяет возможности анализа перекрестных взаимодействий. $0.05 < \alpha < 0.25$ — параметр активации системы (определяется в зависимости от численности населения и плотности в соответствии с кривой Гаусса); $\gamma > 0$; β — кинетический параметр затухания потенциала ингибитора, $\gamma > 0$; β — кинетический параметр взаимодействия активатора и ингибитора, $\beta > 0$.

В линейных системах, близких к состоянию равновесия, сопряженные многокомпонентные потоки вещества и энергии связаны линейными соотношениями Онзагера, где перекрестные коэффициенты определяют взаимовлияние потоков. Интенсивности потоков могут быть разными, но матрица коэффициентов симметрична. В нелинейных системах кинетические параметры прямых и обратных взаимодействий не равны, и воздействие потоков друг на друга становится несимметричным. Чем больше потенциал активатора, тем больше от него зависит потенциал ингибитора, поэтому как прямой коэффициент параметр γ значительно больше перекрестного.

D_u и D_v — коэффициенты диффузии активатора и ингибитора, ε — параметр, характеризующий скорость распространения активатора ($\varepsilon > 0$ и $\varepsilon \leq 1$), отражает значительное различие скоростей изменения функций активатора и ингибитора: скорость изменения u значительно больше скорости изменения v . Всплеск функции u формируется при достаточно малых значениях ε . Для параметров $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.5$, $D_u = 0.25$, $D_v = 0.06$ и при начальных условиях

$$u_0(x) = \begin{cases} 0.7, & x \in [0.5L - 0.1, 0.5L + 0.1], \\ 0, & x \in [0, 0.5L - 0.1) \cup (0.5L + 0.1, L], \end{cases}$$

получаем, что даже при $\beta = 0$ решение уравнения (1) для функции интенсивности активатора не затухает только при $0 < \varepsilon \leq \varepsilon_0$, где $\varepsilon_0 \approx 0.151$ (L — длина расчетной области). Иначе говоря, для формирования описанных выше структур действительно нужно существенное различие скоростей процессов, связанных с ингибитором и активатором.

Система рассмотрена на интервале $x \in (0, l)$ с граничными условиями Неймана

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0, x=l} = \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{x=0, x=l} = 0$$

и начальными условиями

$$u|_{t=0} = u_0(x), \quad v|_{t=0} = v_0(x), \quad x \in [0, l].$$

Вырожденное уравнение

$$u(u - \alpha)(u - 1) + uv = 0$$

имеет три корня: $u_1 = 0$, а u_2 и u_3 действительны только при условии

$$v \leq \frac{(1 - \alpha)^2}{4}. \quad (2)$$

При выполнении условия $\alpha + v > 0$ нулевые корни u_1 и u_3 устойчивы, а корень u_2 неустойчив.

При условии существования на некотором интервале I изменения функции v интеграла

$$\int_{u_1}^{\psi(v)} f(u, v) du = 0,$$

где $f(u, v) < 0$ при $u_2 < u \leq \psi(v)$, $v \in I$ данная система уравнений может допускать решение типа всплеска [6] и ненулевые действительные корни при условии

$$v \leq \frac{2\alpha^2 - 5\alpha + 2}{9}. \quad (3)$$

Существенно, что при выполнении условия (3) условие (1) заведомо выполняется.

Рассмотрим основные условия «рождения» автоволн в неоднородной среде без учета зависимости α от плотности населения (упрощенная модель).

1. Если параметр β , отвечающий за связь функции ингибитора v с функцией активатора u достаточно мал, условие (7) выполняется во всей расчетной области в любой момент времени. В качестве начального условия для u был взят всплеск

$$u_0(x) = \begin{cases} 0.7, & x \in [4.9, 5.1], \\ 0, & x \in [0, 4.9) \cup (5.1, 10]. \end{cases}$$

Максимальное значение функции $u_0(x)$ выбрано в области влияния устойчивого корня $u_3(0)$. Начальные условия для функции v приняты нулевыми. С течением времени решение $u(x, t)$ притягивается к устойчивому корню u_3 , и всплеск расплывается до порогового значения, занимая всю расчетную область (рис. 1).

Достижение процессом активатора порогового уровня в данном случае связано со значительным различием между коэффициентами диффузии активатора и ингибитора ($D_u/D_v = 4.16$) и между соответствующими параметрами ($\gamma/\beta = 277.8$). В данном случае можно говорить о прессинговом воздействии антропогенных факторов и, следовательно, о формировании необратимого процесса в экосистеме.

2. Все параметры, кроме $\beta = 0.2$, такие же, как и в первом случае. При выбранном параметре β функция v в центре области, занимаемой всплеском функции u , достигает значений, при которых нарушаются условия (2) и (3). Правая часть уравнения для функции

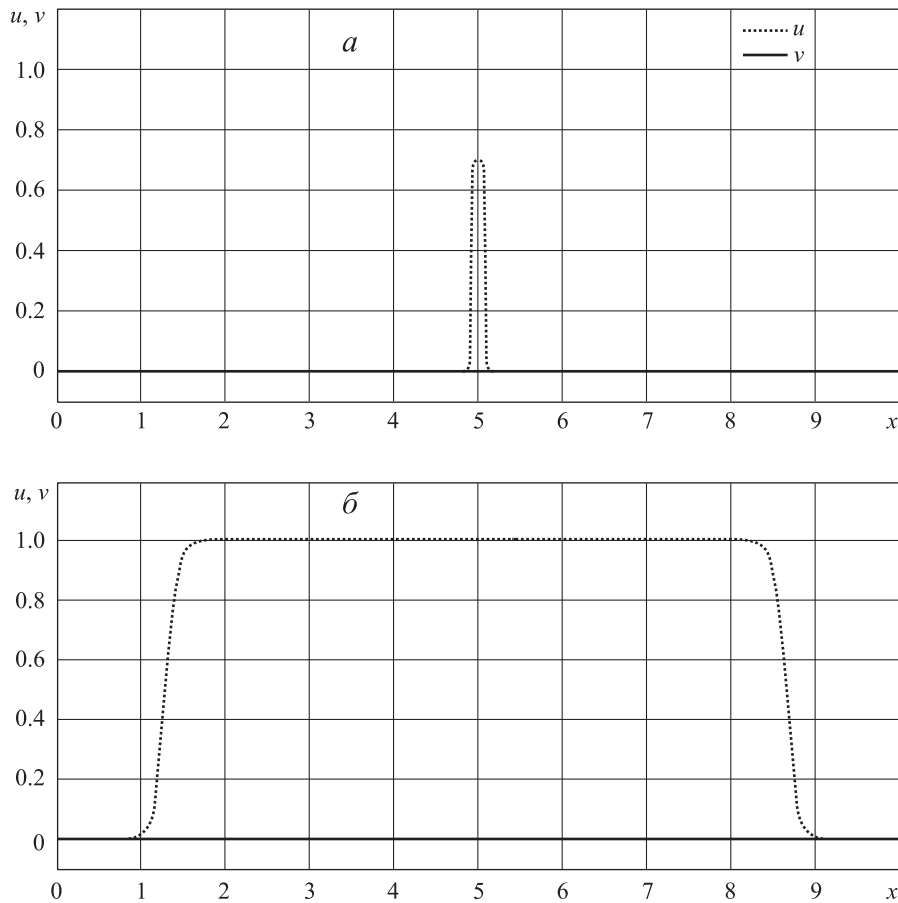


Рис. 1. «Расплывающийся» всплеск активатора: а, б — начальная и конечная стадии процесса при $\varepsilon = 0.1$, $\gamma = 0.5$, $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.0018$, $D_u = 0.25$, $D_v = 0.06$, $l = 10$ (пунктиром обозначена функция активатора, сплошной линией — функция ингибитора)

активатора u в центре всплеска имеет только один (нулевой) устойчивый корень. При нулевых начальных условиях функция ингибитора v отлична от нуля только внутри области всплеска функции активатора u , а ближе к его краям условие (3) выполнено. В этом случае формируются два бегущих импульса. Решение $u(x, t)$ притягивается к устойчивому корню в соответствующей области. В этом случае решение $u(x, t)$ притягивается к устойчивому корню в соответствующей области (рис. 2).

Во втором случае соотношением констант активатора и ингибитора ($\gamma/\beta = 2.5$) почти в 100 раз меньше, чем в первом случае. Результат: потенциал природных процессов оказывается достаточным для нивелирования негативных антропогенных процессов путем возбуждения двух разнонаправленных автоволн. Таким образом, можно сделать вывод, что необратимость/обратимость системных процессов зависит от соотношения констант активатора и ингибитора γ/β .

3. Два одинаковых импульса, движущихся навстречу друг другу, аннигилируют (рис. 3).

Для аннигиляции негативных воздействий, сформированных в какой-то точке пространства, достаточно найти в системе отрицательных обратных связей факторы, которые, будучи приложенными в другой точке этого пространства, уничтожат эти воздействия. Этот случай аналогичен одному из способов борьбы с пожарами: встречное пламя уничтожает первичный пожар. Учитывая полученные данные, важным представляется нахождение оптимального пространственного расположения зон воздействия активатора и ингибитора при

условии одинаковых встречных импульсов.

4. Несимметричные начальные условия. Если функция $v_0(x)$ отлична от нуля в области левее начального всплеска функции u , причем $v_0(x)$ принимает значения, при которых правая часть уравнения для функции u имеет лишь один вещественный корень $u_1 = 0$, то до тех пор, пока $v(x, t)$ не достигнет значений, при которых выполнено условие (2), формируется бегущий вправо импульс $u(x, t)$ (рис. 4), $\gamma/\beta = 3.8$.

Расширение начального всплеска функции активатора в полной мере можно отнести за счет «запаздывания» функции ингибитора, которая не успевает противодействовать формированию всплеска. Этот вывод очень важен в условиях чрезвычайной мозаичности биоценозов в УЭС. На скорость и площадь распространения автоволнового режима влияет пространственное распределение и размеры локальных невозбудимых, слабовозбудимых зон и зон повышенной возбудимости в неоднородной среде. Так, при наличии только локальной зоны повышенной возбудимости (следовательно, остальную среду можно рассматривать как квазиоднородную) происходит практически симметричное распространение автоволн в двух направлениях. Несимметричное распространение возбуждения возникает при наличии локальных зон разной возбудимости, а также, если ширина зоны пониженной возбудимости сопоставима с критической. Для каждого значения параметра, характеризующего возбудимость неоднородного участка, существует критическое значение ширины невозбудимой зоны, при котором автоволна способна продолжить дальнейшее распространение [7].

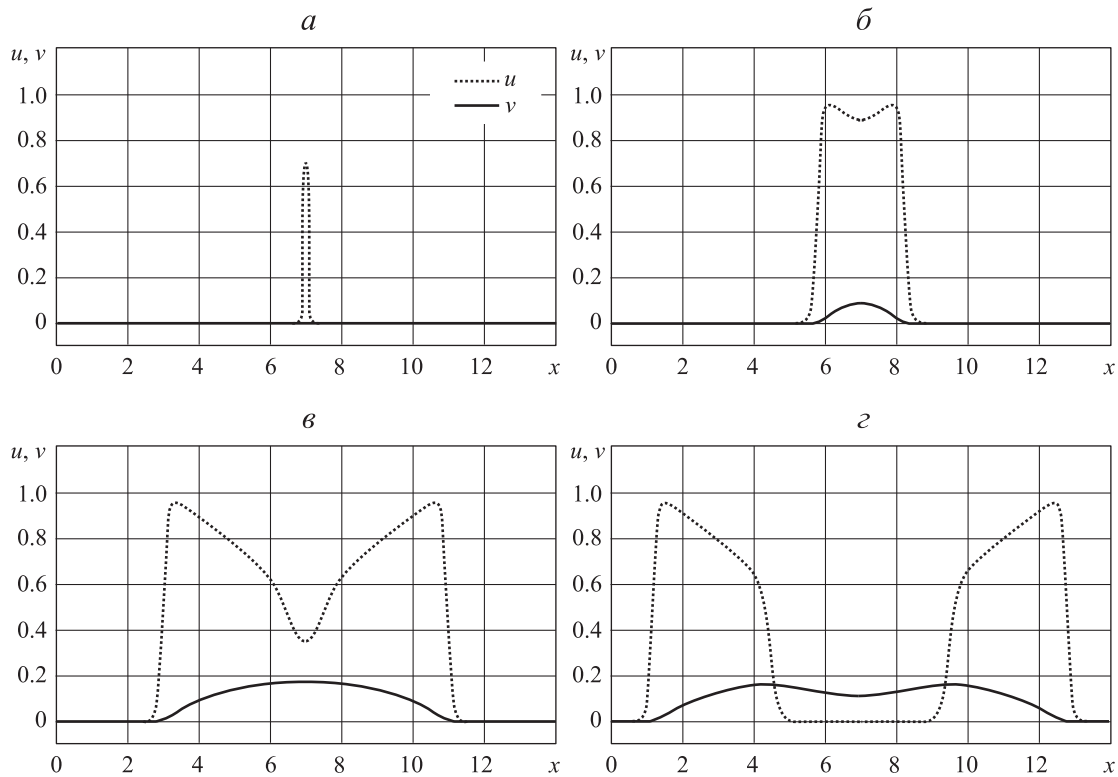


Рис. 2. Провал «расплавляющегося» всплеска активатора в центре и формирование двух бегущих импульсов при формировании волн возбуждения активатора и ингибитора в одной зоне пространства — центре исследуемой области: а, б, в, г — стадии процесса при $\varepsilon = 0.1$, $\gamma = 0.5$, $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.2$, $D_u = 0.25$, $D_v = 0.06$, $l = 10$ (пунктиром обозначена функция активатора, сплошной линией — функция ингибитора)

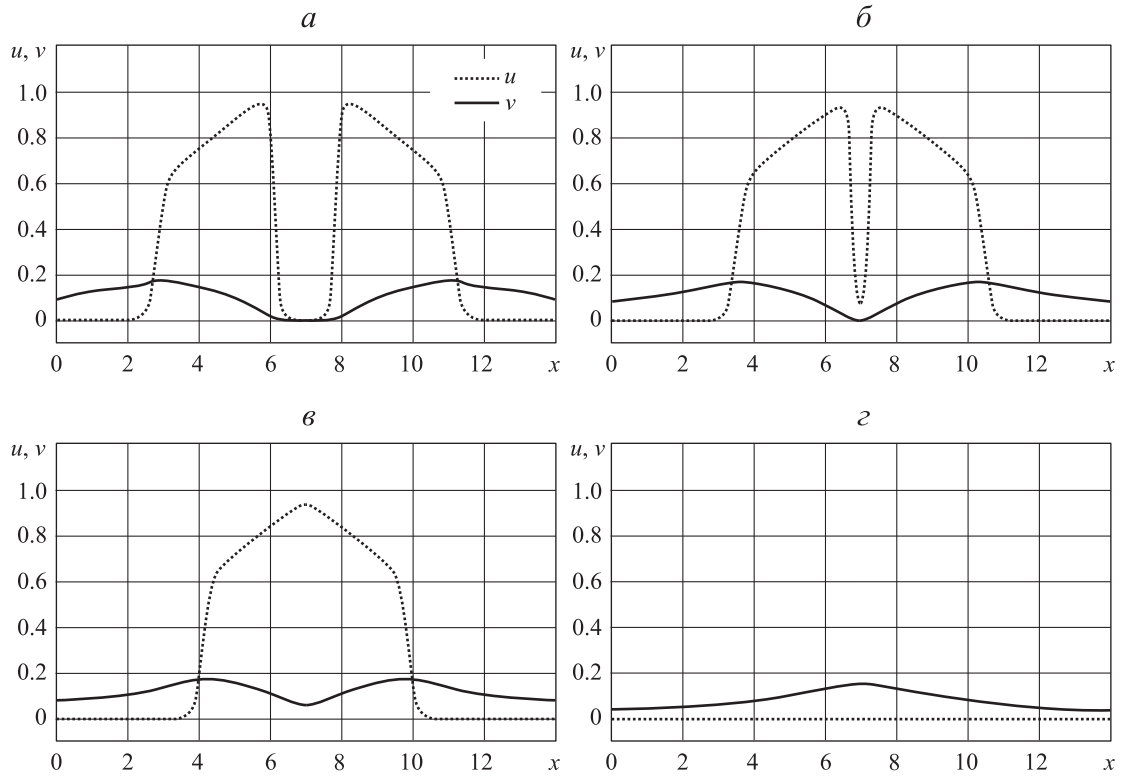


Рис. 3. Аннигиляция одинаковых встречных импульсов: а, б, в, г — стадии процесса при $\varepsilon = 0.1$, $\gamma = 0.5$, $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.2$, $D_u = 0.25$, $D_v = 0.06$, $l = 14$ (пунктиром обозначена функция активатора, сплошной линией — функция ингибитора)

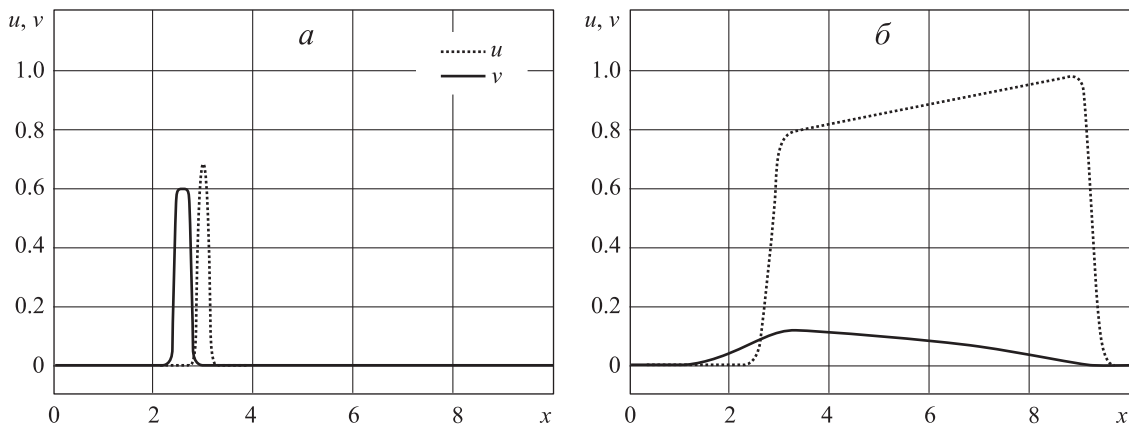


Рис. 4. Расширение начального всплеска функции u (несимметричные начальные условия): а, б — начальная и конечная стадии процесса при $\varepsilon = 0.1$, $\gamma = 0.5$, $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.13$, $D_u = 0.25$, $D_v = 0.06$, $l = 14$ (пунктиром обозначена функция активатора, сплошной линией — функция ингибитора)

В качестве примера использования данного подхода можно привести следующий. Для УЭС полученные закономерности связаны с расположением и размерами биоценозов и строений в условиях воздействия электромагнитных полей (ЭМП) промышленных частот. Большая часть биомассы сосредоточена в верхних слоях литосферы, и именно низкочастотные ЭМП могут распространяться в грунте на значительные расстояния от источника возбуждения. Это обусловлено параметрами источника (геометрические размеры и форма, сила тока, степень защищенности сооружений от утечек) и удельным электрическим сопротивлением грунта [8]. С другой стороны, в отличие от высокочастотных полей, характеризующихся скин-эффектом,

ЭМП способны проникать в верхние слои литосферы на десятки и сотни метров. При этом магнитная, электрическая, тепловая, химическая и другие «мишени» воздействия ЭМП, взаимодействуют нелинейно и неаддитивно. Поэтому в зонах воздействия ЭМП может существенно изменяться не только количественный, но и качественный состав биоценозов: трудно прогнозируемая обратная связь (как по знаку, так и по величине) между природной и антропогенной подсистемами. По нашим данным, размеры характерных зон неоднородностей интенсивности низкочастотных ЭМП соответствуют размерам биоценозов УЭС (от 30 до 100 м в зависимости от этажности застроек), а средняя величина поглощаемой почвенно-грунтовыми средами

от мощности, излучаемой наземными источниками, составляет до 20% [3, 4]. Несоблюдение этих масштабов значительно увеличивает неоднородность электромагнитного фона с большими градиентами напряженностей электрической и магнитной компонент ЭМП и снижает уровень биобезопасности.

Порог устойчивости системы непосредственным образом связан с суперпозицией малых флуктуаций в слабозбудимых зонах (в биосистемах это эффект накопления слабых доз). В этих зонах возможно возникновение незатухающих источников импульсов, распространяющихся в различных направлениях с одинаковой частотой — латентных источников автоволн [4]. Таким образом, величина эффективной скорости распространения волны активатора в потоке активной среды зависит от гетерогенности среды (пространственного соотношения размеров возбудимых, слабозбудимых и невозбудимых зон). Мозаичность распределения слабозбудимых и невозбудимых зон, размер которых существенно меньше длины волны, а также структурно-функциональная сложность УЭС, связанная с наличием сети прямых и обратных связей, способны усиливать или подавлять антропогенные воздействия на автоволновую самоорганизацию экосистемы. В этом случае возможно формирование множественных латентных источников автоволн, туннельных эффектов и «запирания» автоволны. В результате возможно возникновение хаотического режима самоподдерживающихся возбудений в ограниченной области пространства [10].

Заключение

Базовая идея настоящей статьи состоит в следующем: экосистемы — это сложные иерархические системы, которые сопрягают различающиеся на порядки величин масштабы систем и событий.

Self-organization as the driving force for evolution of the biosphere

A. E. Sidorova^{1,a}, Yu. V. Mukhartova^{2,b}

¹Department of Biophysics; ²Department of Mathematics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^asky314bone@mail.ru, ^bmuhartova@yandex.ru.

In this paper we present the space-time model of urboecosystems as conjugate active media. This approach is based on the representation of urboecosystems as self-organizing systems, aims to identify the threshold values of control parameters, and is considered promising in assessing system stability to internal and external fluctuations.

Keywords: self-organization, hierarchy of active media, autowaves, urban ecosystems.

PACS: 02.30.Jr.

Received 26 April 2013.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2013).

Сведения об авторах

1. Сидорова Алла Эдуардовна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-11-95, e-mail: sky314bone@mail.ru.

2. Мухартова Юлия Вячеславовна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: muhartova@yandex.ru.

Полученные данные дают возможность разработки прямой и адекватной оценки антропогенных воздействий в возбудимой среде УЭС. Управление параметрами автоволновой среды посредством локальных воздействий может иметь широкие перспективы, особенно в случае слабозбудимых сред. Иными словами, внесение внешних локализованных воздействий способно влиять на макроскопическую картину автоволновой динамики самоорганизации УЭС.

В качестве процессов, подверженных развитию в автоволновых режимах, могут быть также рассмотрены взаимодействия различных факторов в офисных, спальных, производственных и сельскохозяйственных районах, культурных зонах и зонах отдыха в границах городских агломераций. В принципе модель может быть расширена на водоохранные и транспортные системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-05-01174-а).

Список литературы

1. Твердислов В.А., Сидорова А.Э., Яковенко Л.В. Биофизическая экология. М., 2011.
2. Сидорова А.Э., Твердислов В.А. // Физические проблемы экологии (экологическая физика): Сб. науч. трудов. М., 2010. **16**. С. 287.
3. Сидорова А.Э. // Физические проблемы экологии (экологическая физика): Сб. науч. трудов. М., 2007. **14**. С. 293.
4. Сидорова А.Э., Твердислов В.А. // Научно-техническая революция. 2011. **90**, № 4. С. 3.
5. FitzHugh R.A. // Biophys. J. 1961. **1**. P. 445.
6. Бутузов В.Ф. // Журн. вычисл. математики и матем. физики. 1997. **37**, № 4. С. 415.
7. Попцова М.С., Гурия Г.Т. // Биофизика. 2003. **48**, № 6. С. 1116.
8. Трофимов В.Т. Грунтоведение. М., 2005.